

## PEMBUATAN SUMBER RADIASI GAMMA $^{137}\text{Cs}$ DENGAN AKTIVITAS 20 mCi DARI PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ PASCA IRADIASI DALAM CONTAINER STAINLESS STEEL

Aslina Br.Ginting<sup>1)</sup>, Yanlinastuti<sup>1)</sup>, Noviarty<sup>1)</sup>, Boybul<sup>1)</sup>, Arif Nugroho<sup>1)</sup>, Dian Anggraini<sup>1)</sup>, Rosika Kriswarini<sup>1)</sup>, Sriyono<sup>2)</sup>, Moch Subechi<sup>2)</sup>, Gatot W<sup>3)</sup>, Hermawan<sup>3)</sup>

<sup>1</sup>Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN

<sup>2</sup>Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka –BATAN

<sup>3</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi –BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: [aslina@batan.go.id](mailto:aslina@batan.go.id)

(Naskah diterima : 24-08-2015, Naskah direvisi: 16-09-2015, Naskah disetujui: 22-09-2015)

### ABSTRAK

**PEMBUATAN SUMBER RADIASI GAMMA ISOTOP  $^{137}\text{Cs}$  DENGAN AKTIVITAS 20 mCi DARI PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  PASCA IRADIASI DALAM CONTAINER STAINLESS STEEL.** Kegiatan uji pasca iradiasi pelat elemen bakar (PEB)  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  banyak menghasilkan larutan dengan keaktifan yang sangat tinggi. Larutan tersebut mengandung isotop  $^{137}\text{Cs}$ , uranium serta transuranium yang mempunyai waktu paroh panjang dan berbahaya bagi lingkungan. Namun larutan tersebut memiliki nilai ekonomis tinggi karena dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk pembuatan sumber radiasi sinar gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$ . Hal ini dapat membantu bidang industri dalam memenuhi kebutuhan sumber radioaktif dalam negeri karena selama ini kebutuhan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di Indonesia masih tergantung dari industri luar negeri. Selain itu, pengadaan dan transportasi isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari luar negeri serta dalam penggunaannya memerlukan persyaratan yang cukup ketat dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nasional (BAPETEN), sehingga menyebabkan harga isotop  $^{137}\text{Cs}$  menjadi mahal sampai di Indonesia. Dengan alasan tersebut, BATAN sebagai lembaga litbang nuklir di Indonesia perlu mempelajari pembuatan sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan hasil pengujian bahan bakar nuklir  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi. Manfaat isotop  $^{137}\text{Cs}$  sangat luas antara lain digunakan dalam menganalisis sampel lingkungan, industri migas, konstruksi, radiografi, perikanan, rumah sakit dan pertambangan. Pembuatan sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dimulai dari pengumpulan larutan hasil pengujian PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ . Larutan larutan hasil pengujian mengandung isotop  $^{137}\text{Cs}$  dan isotop lainnya dikumpulkan menjadi satu dalam botol dengan volume 65 mL. Pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari hasil fisi lainnya dilakukan dengan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung dengan berat 45 gr. Hasil pemisahan diperoleh  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dalam fasa padat dan isotop lainnya berada dalam fasa cair. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering kemudian ditimbang dan diukur aktivitasnya menggunakan spektrometer- $\gamma$ . Hasil analisis dengan spektrometer- $\gamma$  diperoleh aktivitas padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit sebesar 20 mCi. Untuk menjadi sumber radiasi gamma  $^{137}\text{Cs}$ , padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan aktivitas 20 mCi dikemas dengan cara memasukkan ke dalam *inner-outer capsule* terbuat dari *stainless steel* yang telah dirancang sebelumnya. *Container stainless steel* diproses menjadi sumber radiasi gamma tertutup (*shield source*) untuk selanjutnya disertifikasi oleh PTKMR-BATAN sebagai lembaga kalibrator bahan radioaktif di BATAN.

**Kata kunci:** Larutan proses PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ , radioaktif gamma, isotop  $^{137}\text{Cs}$ , penukar kation, zeolit Lampung dan *container*.

---

## ABSTRACT

**MANUFACTURING OF  $^{137}\text{Cs}$  GAMMA RAY SOURCE WITH ACTIVITY 20 mCi FROM PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  POST IRRADIATION IN STAINLESS STEEL CONTAINER.** In the post-irradiation examination of fuel element plate (PEB)  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ , a solution of high activity as a result of testing nuclear fuel stored in hotcell with enough volume. The solution can not be discarded as waste because it still contains fission isotop such as  $^{137}\text{Cs}$ , uranium and transuranium, which has a long half life and dangerous for the environment. This can help the industry in order to fulfill the needs of a radioactive source in Indonesia, because until now  $^{137}\text{Cs}$  isotope is derived from foreign industries. In addition, the procurement and transportation of isotopes  $^{137}\text{Cs}$  require stringent requirements, because they have to get permission from the National Nuclear Energy Agency (BAPETEN), thus causing the price of high activity  $^{137}\text{Cs}$  isotopes becomes expensive to Indonesia. For these reasons, BATAN as nuclear R&D institutions in Indonesia need to study make isotopes  $^{137}\text{Cs}$  gamma radiation source, which is contained in the waste from spent fuel test results  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ . Isotope  $^{137}\text{Cs}$  can be used very widely, such as in the analysis of environmental samples, the oil and gas industry, construction, radiography, fisheries, hospitals, and mining. Making isotope  $^{137}\text{Cs}$  gamma radiation source starting from the collection of waste from the test results PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ . Waste solution was collected in a bottle with volume 65 mL. Collection of  $^{137}\text{Cs}$  isotopes of other fission carried out using the method of cation exchange with weight 45 gr of zeolite Lampung. The results of separation are  $^{137}\text{Cs}$ -zeolite in the solid phase and the other isotopes are in the liquid phase.  $^{137}\text{Cs}$ -zeolite solid is then dried and then weighed and measured its activity using a spectrometer- $\gamma$ . Result of analysis by spectrometer- $\gamma$  was obtained activity of  $^{137}\text{Cs}$ -zeolite solids was 20 mCi.  $^{137}\text{Cs}$ -zeolite solids then packed in sealed containers (shield source) capsule-shaped stainless steel and then certificate by PTKMR-BATAN.

**Keywords:** Process waste of PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ , gamma radioactive, isotope  $^{137}\text{Cs}$ , cation exchange, zeolite Lampung and container.

## PENDAHULUAN

Dalam melakukan analisis PIE (*Post Irradiation Examination*) khususnya *burn up* mutlak, banyak larutan hasil pengujian bahan bakar nuklir yang disimpan dalam *hotcell* dengan keaktifan yang sangat tinggi. Larutan hasil pengujian tersebut belum dapat dilimahkan ke Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) BATAN karena mengandung hasil fisi isotop  $^{137}\text{Cs}$  (dengan waktu paroh 30,17 tahun) dan unsur-unsur berat dari uranium yang mempunyai waktu paroh yang panjang seperti;  $^{238}\text{U}$  ( $4,47 \times 10^9$  tahun), dan  $^{235}\text{U}$  ( $7,04 \times 10^8$  tahun)<sup>[1]</sup>. Namun larutan hasil pengujian tersebut masih memiliki nilai ekonomis tinggi karena dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk pembuatan sumber satandar sekunder dari isotop  $^{137}\text{Cs}$ . Hingga saat ini di Indonesia, kebutuhan sumber standar isotop  $^{137}\text{Cs}$  masih diimport dari luar negeri dengan harga mahal. Sementara itu di Indonesia, isotop  $^{137}\text{Cs}$  banyak dimanfaatkan di berbagai bidang, antara lain industri pertambangan, perikanan, radiografi, kedokteran nuklir dan penelitian. Hal ini menjadikan latar belakang untuk melakukan pemisahan hasil fisi  $^{137}\text{Cs}$  dengan HE (*heavy element*) yang terdapat di dalam larutan hasil pengujian bahan bakar tersebut. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  mempunyai waktu paroh ( $t_{1/2}$ : 30,17 tahun) dengan *fission yields*  $^{137}\text{Cs}$  sekitar 6,26 %. Hal ini berarti bahwa setiap 100 kali terjadi reaksi fisi (pembelahan) di reaktor akan menghasilkan kurang lebih 6 atom  $^{137}\text{Cs}$ . Fenomena ini menunjukkan bahwa di dalam bahan bakar pasca iradiasi kandungan isotop  $^{137}\text{Cs}$  sebagai pemancar sinar- $\gamma$  lebih dominan dari pada isotop hasil fisi pemancar sinar- $\gamma$  lainnya. Dengan keunggulan tersebut menyebabkan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dijadikan salah satu isotop monitor *burn up* untuk bahan bakar nuklir<sup>[2]</sup>. Berdasarkan fenomena pembentukan isotop  $^{137}\text{Cs}$  sebagai hasil fisi, menunjukkan bahwa pemisahan isotop

$^{137}\text{Cs}$  dalam larutan hasil pengujian PIE dari PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  sangat ekonomis untuk dilakukan<sup>[2]</sup>.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi antara lain adalah metode ekstraksi menggunakan TBP/OK dan metode pengendapan langsung sebagai  $\text{CsClO}_4$ , namun ke dua metode tersebut belum menunjukkan hasil yang baik karena *recovery* pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  diperoleh masing-masing sebesar  $28,03 \% \pm 5,33 \%$  dan  $87,55 \% \pm 1,11 \%$ <sup>[3]</sup>, sedangkan metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung diperoleh *recovery* pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  sebesar  $97,07 \%$ <sup>[4]</sup>. Metode penukar kation yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode yang dikembangkan sendiri di laboratorium Instalasi Radiometalurgi (IRM) mencakup besar kapasitas tukar kation (KTK), daya serap, kinetika dan difusi, *surface area*, komposisi kimia, sifat fisis, mikrostruktur dan analisis XRD dari zeolit Lampung<sup>[5]</sup>.

Zeolit Lampung dari mineral alam dapat menggantikan fungsi resin sintesis sebagai bahan penukar kation. Penggunaan zeolit Lampung sebagai penukar kation akan mengikat isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam bentuk padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dan isotop (U,Pu) berada di dalam supernatan sebagai fasa cair. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam bentuk padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit, untuk selanjutnya diproses menjadi sumber tertutup (*shield source*) dan merupakan sumber radiasi gamma dengan aktivitas tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai industri<sup>[6]</sup>.

Di bidang industri minyak bumi, isotop  $^{137}\text{Cs}$  digunakan dalam pengujian kualitas las pada pipa minyak/gas dan instalasi kilang minyak dengan teknik radiografi. Teknik ini juga digunakan pada uji kualitas las dari ketel uap tekanan tinggi serta uji kekerasan dan keretakan pada

konstruksi beton. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  juga digunakan sebagai bahan perunut untuk mendeteksi ketebalan bahan, mendeteksi kebocoran, kehausan atau kekeroposan pipa tanpa merusak (*Non Destructive Test*, NDT). Di dalam industri perikanan, isotop  $^{137}\text{Cs}$  digunakan sebagai media pengawetan ikan tuna, kepiting dan udang sewaktu dilakukan pengiriman dalam skala besar di dalam kontainer ke luar negeri serta dapat membantu petani dan nelayan untuk mengawetkan udang atau bandeng dalam mengembangkan kegiatan usaha kecil menengah (UKM).

Di bidang kesehatan atau rumah sakit isotop  $^{137}\text{Cs}$  dimanfaatkan sebagai kalibrator dosis sumber radiasi gamma untuk mengkalibrasi peralatan terapi tumor dan kanker. Sel kanker lebih sensitif (lebih mudah rusak) terhadap radiasi dibandingkan dengan sel normal, sehingga radioisotop digunakan untuk membunuh sel kanker dengan mengatur arah dan dosis radiasi<sup>[7]</sup>.

Di dalam industri pertambangan, isotop  $^{137}\text{Cs}$  aktivitas tinggi digunakan sebagai *probe* pada alat *gamma logging* disekitar batuan atau sedimen pada sistem *geophysical logging*. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  aktivitas tinggi digunakan oleh geologist sebagai *probe* dalam mendeteksi kedalaman sumber minyak pada saat pemboran minyak dan kedalaman batu bara, nikel, emas dan hasil tambang lainnya pada saat pencarian hasil tambang tersebut. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  dapat dibuat menjadi *probe* dengan cara memasukkan isotop  $^{137}\text{Cs}$  ke dalam suatu tabung yang dilengkapi detektor, kamera dengan suatu *software* untuk pencatat densitas (dapat membedakan densitas rendah atau densitas tinggi dari suatu batuan). Hal ini sudah umum dilakukan oleh ahli geologist dalam menjejaki dan mencari batuan maupun mineral di industri pertambangan<sup>[8,9]</sup>.

Demikian besar manfaat isotop  $^{137}\text{Cs}$  di segala bidang, namun kebutuhan

akan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di Indonesia masih sangat tergantung dari industri luar negeri dan masih diimport dari Eropa maupun Amerika Serikat. Selain harganya mahal (harga isotop  $^{137}\text{Cs}$  aktivitas 20 mCi dapat mencapai sekitar Rp 125.000.000)<sup>[10,11]</sup>, pengadaannya maupun transportasinya memerlukan persyaratan yang ketat dan izin persetujuan dari lembaga perizinan nuklir Indonesia BAPETEN. Hal ini dikhawatirkan akan disalahgunakan untuk maksud tidak damai. Ketergantungan tersebut menyebabkan kendala bagi laboratorium pengujian maupun industri yang memerlukan isotop  $^{137}\text{Cs}$ . Untuk mengatasi ketergantungan tersebut, BATAN sebagai lembaga litbang nuklir di Indonesia berpeluang untuk melakukan penelitian pembuatan sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam negeri dari larutan hasil pengujian bahan bakar pasca iradiasi PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  yang sudah berada di *hotcell* laboratorium IRM- BATAN selama 18 tahun. Selain itu, kegiatan ini dapat mengurangi larutan radioaktif yang ada di *hotcell* PTBBN. Untuk itu, PTBBN bekerja sama dengan PTRR dan PTKMR- BATAN melakukan kegiatan penelitian untuk pembuatan sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam *container stainless steel* dengan aktivitas 20 mCi ( $1\text{Ci} = 37 \times 10^9 \text{ Bq}$ ) dari larutan hasil pengujian PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi.

Bentuk *inner capsule* dari isotop  $^{137}\text{Cs}$  akan dirancang seperti bentuk yang di tawarkan oleh Eckert & Ziwgler dari Berlin-Germany. Besar perhitungan biaya meliputi biaya izin pemanfaatan, izin transportasi, pengawasan yang dilakukan oleh PT. Energia Protektama harga isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam *container stainless steel* tersebut sampai di Indonesia dapat mencapai Rp.125.000.000<sup>[10,11]</sup>.

Tujuan penelitian ini adalah untuk membuat sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan aktivitas 20 mCi di dalam *container stainless steel*. Selain pembuatan

sumber isotop  $^{137}\text{Cs}$  tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari metode atau teknik pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  diperoleh dari larutan hasil pengujian PIE menggunakan zeolit Lampung. Hasil pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  berupa padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit, kemudian diproses atau dikemas menjadi sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  yang tersertifikasi oleh PTKMR. Isotop  $^{137}\text{Cs}$  tersebut terkungkung di dalam *container stainless steel* sebagai *shield source* dan siap digunakan sebagai sumber radiasi gamma dalam industri.

## METODOLOGI

Dalam pembuatan sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  untuk industri pelaksanaan penelitian diawali dengan beberapa tahapan kegiatan sesuai dengan peraturan keselamatan kerja untuk penanganan bahaya radiasi antara lain:

### a. Pembuatan standar operasi prosedur (SOP)

Pembuatan SOP untuk penanganan bahaya radiasi sebagai persyaratan bekerja pada zona daerah radiasi dengan membuat beberapa SOP antara lain: SOP pelarutan, SOP transfer, SOP pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi dan SOP proses proses *loading* padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ke dalam *inner capsule stainless steel*<sup>[13]</sup> serta SOP transfer can Pb dari PTBBN ke PTRR. Pembuatan SOP mengacu kepada ASTM maupun pustaka yang berkaitan dengan pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dan pembuatan sumber radiasi gamma. Disamping membuat SOP, sebelum melaksanakan penelitian, supervisor harus mempertimbangkan kemungkinan potensi bahaya radiasi dan kontaminasi yang terjadi dengan menyusun HIRADC (*Hazard Identification Risk Assesment Determining Control*) yang diketahui dan disahkan oleh Bidang Keselamatan (BK) PTBBN serta penggunaan APD (alat pelindung diri) yang

sesuai dengan besarnya paparan radiasi yang akan ditangani<sup>[12]</sup>.

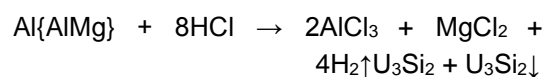
### b. Validasi metode penukar kation

Validasi metode dilakukan di luar *hotcell* dengan mengukur aktivitas dari standar  $^{137}\text{Cs}$  SRM 4233E isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari NIST (*National Institute of Standards Technology*)<sup>[13]</sup>. Larutan standar  $^{137}\text{Cs}$  dipipet sebanyak 50  $\mu\text{L}$  dan masing-masing di masukkan ke dalam 3 (tiga) buah vial yang telah diberi label. Ke dalam masing-masing vial ditambahkan zeolit Lampung seberat 1 gram dan dilakukan proses penukar kation dengan pengocokan vial selama 1 jam menggunakan *shaker* dengan kecepatan

20 rpm serta didiamkan selama 24 jam. Hasil proses penukar kation menunjukkan terjadinya pemisahan antara isotop  $^{137}\text{Cs}$  yang terikat dengan zeolit dalam bentuk padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit sebagai fasa padat dengan unsur pengotor dalam fasa cair. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit hasil pemisahan kemudian diukur kandungan isotop  $^{137}\text{Cs}$  menggunakan Spektrometri- $\gamma$  dengan 5 (lima) kali pengulangan<sup>[14,15]</sup>.

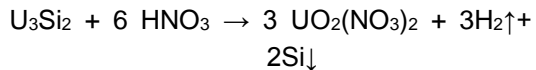
### c. Preparasi Sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pasca iradiasi

Preparasi sampel dilakukan adalah proses penimbangan, pelarutan dan pengenceran. Pelarutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  dilakukan dengan penambahan HCl dan  $\text{HNO}_3$  dalam labu ukur 25 mL dengan 2 (dua) tahap. Pelarutan tahap pertama adalah pelarutan kelongsong AIMg2 dan matrik Al, sedangkan pelarutan berikutnya adalah pelarutan serbuk bahan bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2$ . Reaksi kimia untuk melarutkan kelongsong dan matrik bahan bakar menggunakan HCl 6N dengan reaksi sbb:



Sementara itu, reaksi kimia untuk melarutkan serbuk bahan bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2$

dilakukan dengan menggunakan  $\text{HNO}_3$  6N dengan reaksi sbb:



#### **d. Pemisahan isotop $^{137}\text{Cs}$ dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$**

Pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  dilakukan dengan menggunakan metode penukar kation dengan penambahan zeolit Lampung. Larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi sebanyak 65 mL dalam erlenmeyer ditambahkan zeolit Lampung dengan berat 45 gram. Berat ini sesuai dengan hasil perhitungan kapasitas tukar kation (KTK) terhadap zeolit Lampung, selanjutnya dilakukan proses pertukaran kation dengan cara pengocokan. Setelah selesai proses pertukaran kation, isotop  $^{137}\text{Cs}$  dan zeolit masih tercampur dengan isotop lainnya sehingga harus didiamkan selama 1 (satu) minggu agar padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit terpisah dengan supernatan secara sempurna. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang terbentuk dicuci menggunakan aquades dengan tujuan untuk melepaskan isotop hasil fisi selain  $^{137}\text{Cs}$ . Untuk menghilangkan kandungan air di dalam padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit, selanjutnya dilakukan pengeringan secara alami di dalam *hotcell* selama 3 (tiga) hari, sehingga diperoleh padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering dengan berat  $\pm 45$  gram.

#### **e. Penggerusan padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit menjadi serbuk yang homogen**

Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering dengan berat  $\pm 45$  gram dalam beaker gelas dipindahkan ke dalam lumpang untuk dilakukan penggerusan agar diperoleh serbuk  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang homogen dan *free flowing*. Penggerusan dilakukan secara manual menggunakan tangan manipulator secara perlahan-lahan agar tidak terjadi ketumpahan padatan di dalam *hotcell*.

#### **f. Pencuplikan padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat 5 mg**

Dalam usaha untuk mengetahui homogenitas padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan paparan radiasi dalam batas ambang yang dipersyaratkan  $\leq 150 \mu\text{Sv/jam}$ , maka dilakukan pencuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit pada 3 (tiga) posisi dengan berat tertentu, namun yang harus diperhatikan dalam kegiatan ini adalah paparan radiasi tidak melebihi nilai  $150 \mu\text{Sv/jam}$  (persyaratan BAPETEN dan IAEA). Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam vial untuk ditransfer dari *hotcell* ke R.135 (keluar *hotcell*) melalui pintu belakang *hotcell* HC-112. Sebelum cuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dibawa keluar dari *hotcell* terlebih dahulu harus dilakukan pengukuran paparan radiasi pada permukaan vial menggunakan surveymeter pendeteksi sinar gamma. Bila paparan radiasinya  $< 150 \mu\text{Sv/jam}$ , maka cuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit tersebut dapat dimasukkan ke dalam can Pb dan dibawa ke R.135 untuk dilakukan pengukuran aktivitasnya menggunakan spektrometer- $\gamma$ . Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat 5 mg (paparan radiasi  $< 150 \mu\text{Sv/jam}$ ), kemudian diukur aktivitas isotop  $^{137}\text{Cs}$  menggunakan spektrometer- $\gamma$  yang berada di laboratorium PTBBN, PTRR dan PTKMR. Pengukuran aktivitas dilakukan dengan 3 (tiga) kali pengulangan dengan waktu cacah selama 500 menit. Kegiatan ini merupakan uji banding antar laboratorium agar diperoleh hasil pengujian yang akurat dan homogenitas baik.

#### **g. Perancangan *Container stainless steel* sebagai wadah sumber radiasi gamma**

Perancangan wadah terdiri dari *inner capsule*, *outer capsule* dan kontainer terbuat dari bahan *stainless steel* yang dilapis dengan Pb sebagai *shielding*. Pelapisan bahan Pb bertujuan untuk menghindari paparan radiasi dari sumber isotop  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan, sehingga

diharapkan paparan radiasi dilingkungan sekitar  $0,5 \mu\text{Sv/jam}$  (persyaratan BAPETEN maupun IAEA). Dimensi *inner capsule*, *outer capsule* dirancang berdasarkan berat padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit  $\pm 45 \text{ gr}$ . *Inner* dan *outer capsule* yang dirancang mempunyai dimensi panjang (P) sebesar 165 mm, *inside* diameter (ID) sebesar 19 mm dan *outside* diameter (OD) sebesar 26,7 mm, sedangkan untuk *outer capsule* mempunyai dimensi sebesar P= 199 mm, ID= 27,86 mm, dan OD= 33,4 mm<sup>[11]</sup>.

#### **h. Proses loading padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ke dalam *inner capsule***

Setelah selesai perancangan dan pembuatan *inner capsule* dan *outer capsule* kemudian dilakukan penimbangan berat *inner capsule*. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering dimasukkan ke dalam *inner capsule* kemudian dilakukan penimbangan kembali agar diketahui berat padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit secara akurat. *Inner capsule* yang telah berisi padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ditutup dengan penutup yang telah disediakan sambil dikencangkan dengan memutar searah dengan jarum jam menggunakan obeng minus di dalam *hotcell*. *Inner capsule* selanjutnya dimasukkan ke dalam *outer capsule*. Untuk menghindari paparan radiasi *inner-outer capsule* dimasukkan ke dalam *can Pb* untuk dibawa dari *hotcell* ke PTRR-BATAN untuk selanjutnya dilakukan pengemasan.

#### **i. Pengemasan dan sertifikasi sumber radiasi gamma**

Pengemasan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dilakukan dengan cara penanganan radioaktif aktivitas tinggi mengikuti prosedur yang telah ditetapkan oleh BAPETEN dan IAEA. Pengemasan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit menjadi sumber radiasi gamma dilakukan di PTRR-BATAN. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dalam *inner - outer capsule* disolder tutupnya agar padatan tidak tumpah. Untuk menghindari

paparan radiasi *inner-outer capsule* dimasukkan ke dalam *container stainless steel* dilapisi Pb sebagai *shielding* yang sebelumnya telah dirancang. Sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  telah terkungkung dalam *container stainless steel* dan siap untuk disertifikasi oleh PTKMR-BATAN

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **a. Pembuatan standar operasi prosedur (SOP)**

SOP yang dibuat dan telah mendapat persetujuan dari Unit Jaminan Mutu, UJM-PTBBN adalah SOP pelarutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ , SOP transfer, SOP pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam bahan bakar nuklir dandan SOP proses *loading* padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ke dalam *inner capsule* serta SOP penelitian terkait dengan potensi bahaya radiasi dan kontaminasi sebagai persyaratan bekerja pada zona daerah radiasi telah dibuat dengan menyusun HIRADC (*Hazard Identification Risk Assesment Determining Control*).

#### **b. Validasi metode penukar kation**

Hasil validasi metode dan optimasi parameter diperoleh berat zeolit yang optimal adalah 1000 mg dan berat padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang diperoleh sebesar 994 mg. Hasil pengukuran padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit diperoleh cacahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan aktivitas sebesar 121,105 kBq, sedangkan dari sertifikat diketahui aktivitas standar  $^{137}\text{Cs}$  sebesar 123,984 kBq. Kandungan  $^{137}\text{Cs}$  di dalam 50  $\mu\text{L}$  standar SRM 4233E hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan kandungan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dari sertifikat sehingga diperoleh *recovery* pemisahan sebesar 97,07 %, sedangkan dari pengulangan pengukuran atau *reproducibility* diperoleh presisi pengukuran sebesar 0,778 % dengan SD sebesar 0,126 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1<sup>[15]</sup>.

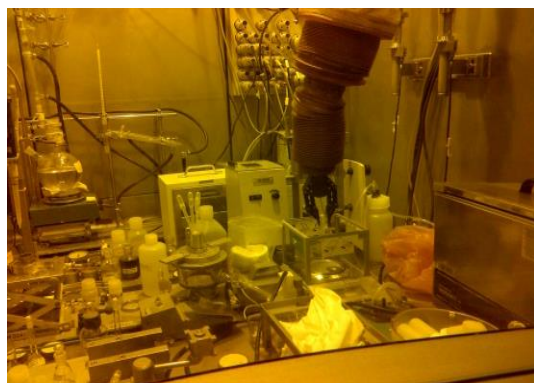
Tabel 1. Kandungan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam 50  $\mu\text{L}$  standar NIST Waktu cacah=1500 detik, cacah  $B_g=0,0018$  cps

Isotop	Net Area (cacah)	Cacah /detik (cps)	$I_\gamma$ tabel (%)	Eff. Detektor	Akt $^{137}\text{Cs}$ pengukuran (kBq)	Akt $^{137}\text{Cs}$ sertifikat (kBq)	Recovery (%)
$^{137}\text{Cs}$	24169	16,223	85,1	0,00156	122,105	123,984	97,07
	24500						
	24495						
	24334,5						

Besarnya *recovery*, SD dan presisi menunjukkan bahwa metode penukar kation yang digunakan dalam pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  telah valid<sup>[15]</sup>, sehingga metode ini dapat digunakan untuk pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  di dalam *hotcell*.

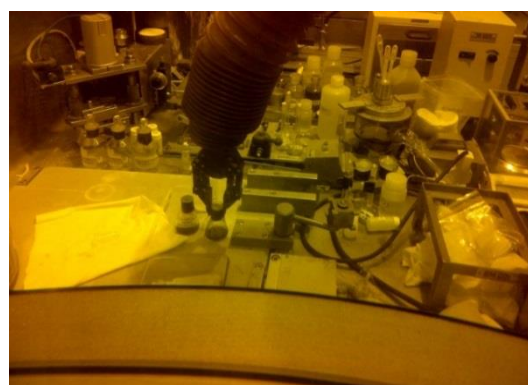
### c. Preparasi Sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ pasca iradiasi

Hasil penimbangan potongan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  dilakukan di dalam *hotcell* diperoleh berat PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  0,402 gr seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Penimbangan potongan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$

Hasil pelarutan potongan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi dengan berat 0,402 gr menggunakan  $\text{HCl}$  6N dan  $\text{HNO}_3$  6N diperoleh larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  25 mL atau setara dengan 26,05 gr larutan.



Gambar 2. Proses Pelarutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  pasca iradiasi

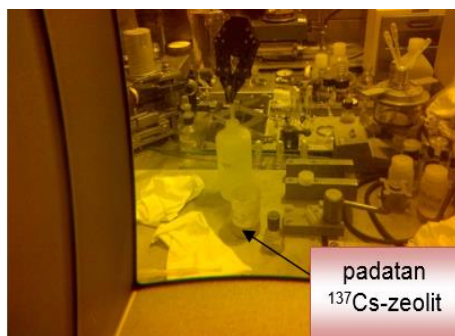
Untuk mengurangi paparan radiasi maka dilakukan pengenceran larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  dari volume 25 mL menjadi 65 mL atau setara dengan 66,56 gr larutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

### d. Pemisahan isotop $^{137}\text{Cs}$ dalam larutan PEB $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$

Hasil pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  seberat 65,56 gr larutan dengan penambahan zeolit Lampung seberat 45 gr menggunakan metode penukar kation diperoleh padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering dengan berat  $\pm 45$  gram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



(Aslina Br.Ginting, Yanlinastuti, Novarty, Boybul, Arif Nugroho, Dian Anggraini, Rosika Kriswarini, Sriyono, Moch Subechi, Gatot W, Hermawan)



Gambar 3. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat 45 gram dalam beaker gelas



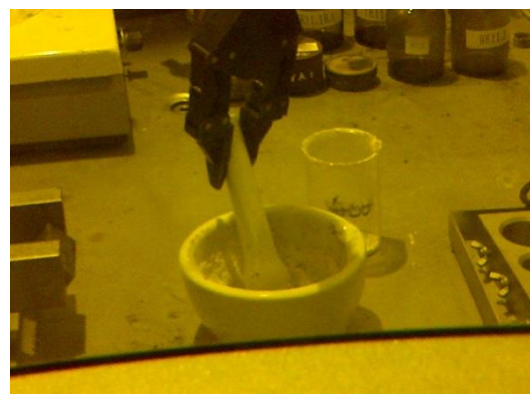
Gambar 4. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit kering sebelum dilakukan penggerusan

#### e. Penggerusan padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit menjadi serbuk yang homogen

Hasil penggerusan diperoleh serbuk  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang homogen dan *free flowing*. Penggerusan dilakukan secara manual menggunakan tangan manipulator secara perlahan-lahan agar tidak terjadi ketumpahan padatan di dalam *hotcell* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Pemindahan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ke dalam lumpang



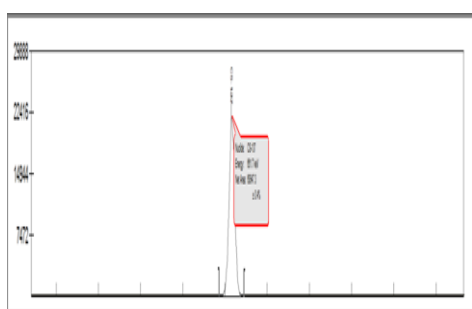
Gambar 6. Penggerusan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit di dalam lumpang

#### f. Pencuplikan padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat 5 mg

Pencuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit pada 3 (tiga) posisi dengan berat cuplikan @ 5 mg dengan paparan radiasi  $43,4 \mu\text{Sv/jam}$  seperti yang terlihat pada Gambar 7. Menurut kaidah statistik pencuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit seharusnya dilakukan pada 7 (tujuh) posisi agar diperoleh data homogenitas yang akurat, namun karena pencuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit di dalam *hotcell* sangat sulit dilakukan menggunakan tangan manipulator, sehingga pencuplikan dilakukan hanya pada 3 (tiga) posisi saja. Hasil pengukuran aktivitas sampel cuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dengan berat 5 mg menggunakan alat Spektrometer- $\gamma$  oleh 3 (tiga) laboratorium PTBBN, PTRR dan PTKMR menunjukkan hasil yang sama seperti yang dituangkan pada Tabel 2 dan Gambar 8. Hasil pengukuran diperoleh aktivitas isotop  $^{137}\text{Cs}$  rerata sebesar  $3,91 \times 10^{-3}$  mCi untuk cuplikan 1 dan untuk cuplikan 2 sebesar  $3,86 \times 10^{-3}$  mCi serta  $4,13 \times 10^{-3}$  mCi untuk cuplikan 3. Besaran aktivitas isotop  $^{137}\text{Cs}$  tidak mempunyai perbedaan yang signifikan untuk masing-masing laboratorium, sehingga dapat dinyatakan bahwa cuplikan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang diperoleh mempunyai homogenitas yang baik.



Gambar 7. Pengukuran paparan radiasi larutan PEB  $U_3Si_2-Al$  pasca iradiasi

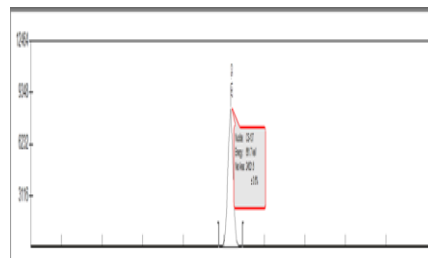


Gambar 8. Spektrum isotop  $^{137}Cs$  di dalam padatan  $^{137}Cs$ -zeolit.

Dalam usaha untuk mengetahui hanya isotop  $^{137}Cs$  yang terikat di dalam zeolit Lampung, dilakukan pembuktian dengan cara melakukan pemisahan isotop  $^{137}Cs$  standar SRM 4233E sebanyak 50  $\mu L$  dan dilakukan proses penukar kation dengan menambahkan zeolit Lampung seberat 1000 mg<sup>[16]</sup>. Padatan isotop  $^{137}Cs$ -zeolit dari standar SRM 4233E yang dihasilkan diukur dengan spektrometer- $\gamma$  dan diperoleh hasil berupa spektrum isotop  $^{137}Cs$  standar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Tabel 2. Hasil uji banding aktivitas  $^{137}Cs$

Cuplikan Padatan	Berat cuplikan Padatan Cs-zeolit (mg)	Aktivitas isotop Cs (mCi)		
		PTBBN	PTRR	PTKMR
1	5,20	3,91x10	3,93x10	3,92x10
2	5,10	3,86x10	3,87x10	3,86x10
3	5,40	4,13x10	4,13x10	4,14x10
Standar	-	4,93x10	4,93x10	4,93x10

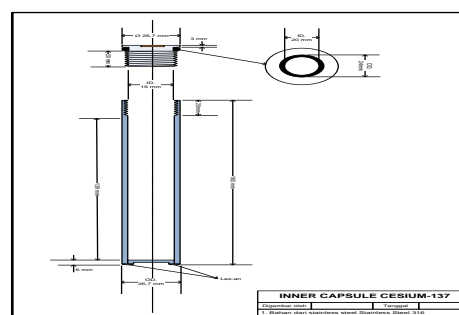


Gambar 9. Spektrum isotop  $^{137}Cs$  standar dalam padatan  $^{137}Cs$ -zeolit

Gambar 8 dan 9 menunjukkan bahwa zeolit Lampung dapat digunakan sebagai pengganti resin sintesis dalam pemisahan isotop  $^{137}Cs$  menggunakan metode proses penukar kation<sup>[17]</sup>. Hal ini dibuktikan dengan spektrum standar isotop  $^{137}Cs$  dari SRM 4233 E yang diperoleh sama dengan spektrum isotop  $^{137}Cs$  dari larutan PEB  $U_3Si_2-Al$  pada masing-masing energi 661,45 keV.

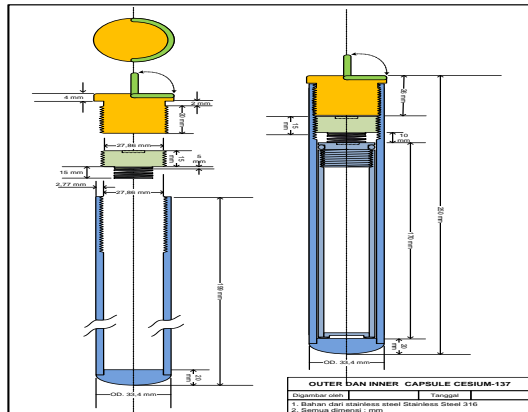
#### g. Perancangan *container stainless steel* sebagai wadah sumber radiasi gamma

Hasil rancangan pembuatan *container* yang terdiri dari *inner capsule*, *outer capsule* terbuat dari bahan *stainless steel* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11. Besarnya dimensi *inner capsule*, *outer capsule* dirancang berdasarkan berat padatan  $^{137}Cs$ -zeolit yang ada yaitu  $\pm 45$  gr. Dimensi *inner* dan *outer capsule* mempunyai ukuran panjang (P)= 165 mm, *inside* diameter (ID)= 19 mm dan *outside* diameter (OD)= 26,7 mm, sedangkan untuk *outer capsule* mempunyai ukuran P= 199 mm, ID= 27,86 mm, dan OD= 33,4 mm.



Gambar 10. Bentuk dan dimensi *inner capsule stainless steel*.

(Aslina Br.Ginting, Yanlinastuti, Noviarty, Boybul, Arif Nugroho, Dian Anggraini, Rosika Kriswarini, Sriyono, Moch Subechi, Gatot W, Hermawan)



Gambar 11. Bentuk dan dimensi *outer capsule stainless steel*

#### h. Proses loading padatan $^{137}\text{Cs}$ -zeolit

Setelah selesai dilakukan proses perancangan dan pembuatan *inner capsule* dan *outer capsule* kemudian dilakukan penimbangan berat *inner capsule*.

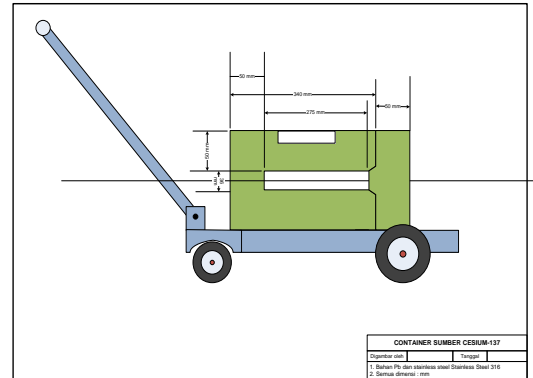


Gambar 12. Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dalam *inner capsule*

Padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dimasukkan ke dalam *inner capsule* dan dilakukan penimbangan kembali agar diketahui berat padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit secara akurat seperti yang terlihat pada Gambar 12.

*Inner capsule* yang telah berisi padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit ditutup, selanjutnya dimasukkan ke dalam *outer capsule*. Untuk menghindari paparan radiasi *inner-outer capsule* dimasukkan ke dalam *container stainless steel* dilapisi Pb sebagai *shielding* yang sebelumnya telah dirancang seperti Gambar 13. Pelapisan bahan Pb bertujuan untuk menghindari paparan radiasi dari

sumber isotop  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan, sehingga diharapkan paparan radiasi di lingkungan sekitar  $0,5 \mu\text{Sv/jam}$  (persyaratan BAPETEN maupun IAEA).



Gambar 13. Rancangan bentuk *container* isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan *shielding* Pb.

#### i. Pengemasan dan sertifikasi sumber radiasi gamma

Pengemasan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dilakukan dengan cara penanganan radioaktif aktivitas tinggi mengikuti prosedur yang telah ditetapkan oleh BAPETEN dan IAEA. Pengemasan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit menjadi sumber radiasi gamma dilakukan di PTRR-BATAN dan diperoleh sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  yang terkungkung di dalam dalam *container stainless steel* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Prototipe *container stainless steel* sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  terbuat dari *stainless steel* dan *shielding* Pb

*Container stainless steel* isotop  $^{137}\text{Cs}$  tersebut, kemudian disertifikasi oleh PTKMR sehingga diperoleh sumber radiasi gamma tertutup (*shield source*) isotop  $^{137}\text{Cs}$  bersertifikat produksi dalam negeri (*local content*). Sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan aktivitas sebesar 20 mCi siap di gunakan sebagai *gamma logging* pada industri pertambangan.

## SIMPULAN

Telah diperoleh sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan aktivitas sebesar 20 mCi di dalam *container stainless steel* siap di gunakan sebagai *gamma logging* pada industri pertambangan. Keberhasilan penelitian PTBBN-PTRR-PTKMR-BATAN membuat sumber radiasi gamma isotop  $^{137}\text{Cs}$  dapat meningkatkan kemampuan SDM untuk memahami metodologi dan teknologi pemisahan isotop  $^{137}\text{Cs}$  sebagai sumber radiasi gamma. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memberi peluang bagi BATAN untuk bekerja sama dengan perusahaan maupun industri untuk mengembangkan penggunaan bahan dan teknologi nuklir diberbagai bidang industri.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.I. Dobrin, T. Craciunescu, M. Pavelescu, (2010), *Candu and Triga Fuel Burn-up Determination Using Axial and Tomographic Gamma Scanning*, Institute for Nuclear Research Pitesti, P.O.Box 78, Campului Street 1, Mioveni, Rumania, November 4.
- [2] A.Nugroho, Boybul, A. Ginting, (2014), Pemungutan Isotop Hasil Fisi  $^{137}\text{Cs}$  Dan Unsur Bermassa Berat Dari Bahan Bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  Pasca Iradiasi Untuk Burn Up, Jurnal Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Serpong.
- [3] A. Br. Ginting, D. Anggraini, A.Nugroho, (2011), Pengaruh Penambahan Zeolit Terhadap Pemisahan Isotop  $^{137}\text{Cs}$  dalam Pelat Elemen Bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  Pasca Iradiasi, Jurnal Teknologi Bahan Buklir- PTBN-BATAN, Vol.7, No.2, Juni.
- [4] A. Br. Ginting, D. Anggraini, A.Nugroho, R.Kriswarini, G.Wurdiyanto, Hermawan, (2014), Pembuatan Isotop  $^{137}\text{Cs}$  Sebagai Sumber Radiasi Gamma Untuk Digunakan Dalam Industri, URANIA, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, Vol.3, Oktober 2014, hal 147-155, ISSN 0852-4777.
- [5] A. Br. Ginting, A. Nugroho, Boybul, (2012), Pemisahan dan Analisis Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  di Dalam PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  Tingkat Muat Uranium 2,96 gU/cm<sup>3</sup> Pasca Iradiasi, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir-PTBN-BATAN, Vol.8 No.1, Januari.
- [6] T.Takahashi, T. Takeuchi, K.Sassa, (2014), *ISRM Suggested Methodes for Borehole Geophysics in Rock Engineering*, International Journal of Rock Menhanics and Mining Sciences, Volume 43, Issue 3, April 2014
- [7] J. Sumanto, A. Jalil, Sukandar, dan Romadhon, (2013), Desain Perangkat Pengukur Aktivitas Dosis Pada Renograf, Prosiding Pertemuan Ilmiah Perekayasaan Perangkat Nuklir, PRPN – BATAN, 14 November 2013, Serpong.
- [8] P.G.Killeen, (2013), *Borehole Logging for Uranium by Measurement of Natural Gamma Radiation*, The Internasional Journal of Applied Radiation and Isotopes, Volume 34, Issue 1, January 2013.
- [9] P.T. Recsalog Geoprima, (2015), Geologist Consultans, Jl. Ratna Niaga No.16, Komp. Kota Baru, Parahyangan, Bandung.

(Aslina Br.Ginting, Yanlinastuti, Noviarty, Boybul, Arif Nugroho, Dian Anggraini, Rosika Kriswarini, Sriyono, Moch Subechi, Gatot W, Hermawan)

- 
- [10] Sudarmadi, (2015), Penawaran Harga Isotop Cs-137 dan U-233, PT. Energia Protektama, Jl.Karang Tengah Raya No.88 H, Lebak Bulus Cilandak, Jakarta Selatan 12240
- [11] Standard Capsule Designs, (2015), *Industrial Radiation Sources, Isotope Product Information*, Eckert & Ziegler-Berlin, Germany.
- [12] S.Kobayashi, T.Shinomiya, H.Kitamura, (2015), *Radioactive Contamination Mapping of Northeastern and Eastern Japan a Car Borne Survey System for Radiation Probe*, Journal of Enviromental Radioactivity, Volume 139, January 2015, page 281-293.
- [13] NIST, (2012), Standar Larutan Isotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan Aktivitas SRM 4233E
- [14] American Stadard Test Methods, ASTM-E 692-00, (2000), *Standard Test Methods for Determining the Content of Cesium-137 in Irradiation Nuclear Fuels by High Resolution Gamma-ray Spectral Analysis*, Standard Test Method for Nuclear Material, USA, Vol.12.1.
- [15] Robert L, Anderson, (1987), *Practical Statistics for Analytical Chemists* Van Nostrand Reinhold Company New York
- [16] J.Real, F.Persin, C.Camarasa Cauret, (2012), *Mechanisms of Desorption Cesium and Stronsium Aerosols Deposited on Urban Surfaces*, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 62, Issue 1.
- [17] H.Simger, F.Arnold, H. Aufurhoff, R.Bauman, F. Kaether, S. Lindemann, L.Rauch, (2014), *Detection of  $^{133}\text{Xe}$  from the Fukusima Nuclear Power Plant in The Upper Troposphere above Germany*, Journal of Evironmental Radioactivity, Volume 132, June 2014.

